



**Projet mermose: caractérisation des émissions  
particulaires en sortie d'un moteur aéronautique civil ;  
de la morphologie à la composition chimique**

D. Delhayé, F.X. Ouf, S. Peillon, F. Salm, Daniel Ferry, D. Gaffié, O.  
Penanhoat, X. Vancassel, T. Cottard, Pascale Desgroux, et al.

► **To cite this version:**

D. Delhayé, F.X. Ouf, S. Peillon, F. Salm, Daniel Ferry, et al.. Projet mermose: caractérisation des émissions particulières en sortie d'un moteur aéronautique civil ; de la morphologie à la composition chimique. 29ème Congrès Français sur les Aérosols (CFA 2014), Jan 2014, PARIS, France. hal-01083412

**HAL Id: hal-01083412**

**<https://hal.science/hal-01083412>**

Submitted on 17 Nov 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## PROJET MERMOSE : CARACTERISATION DES EMISSIONS PARTICULAIRES EN SORTIE D'UN MOTEUR AERONAUTIQUE CIVIL ; DE LA MORPHOLOGIE A LA COMPOSITION CHIMIQUE.

D. Delhaye <sup>\*</sup>(1), F.-X. Ouf (2), S. Peillon (2), F. Salm (2), D. Ferry (3), D. Gaffie (1), O. Penanhoat (4), X. Vancassel (1), T. Cottard (4), P. Desgroux (5), C. Focsa (6), N. Harivel (4), B. Perez (4), E. Quinton (4), J. Yon (7)

(1) Onera – The French Aerospace Lab, F-92322 Châtillon, France.

(2) Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), BP 68, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France.

(3) Aix-Marseille Université, CNRS UMR 7325, CINaM, 13009 Marseille, France.

(4) SNECMA / SAFRAN Group, 77550 Moissy Cramayel, France.

(5) PC2A, UMR CNRS 8522, Université de Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.

(6) PhLAM, UMR CNRS 8523, Université de Lille 1, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.

(7) UMR 6614 CORIA, Université et INSA de Rouen, 76801 Saint-Etienne du Rouvray, France.

david.delhaye@onera.fr

### TITLE

MERMOSE project: Characterisation of particle matter emitted by a civil aircraft engine, from morphology to chemical composition

### ABSTRACT

Considering the steady increase of air transport, the French Government decided to support research that aims to better understand condensation trails formation processes, their impact on climate, and to prevent them and manage their effects. In this framework, we performed a field campaign in order to measure particulate matter (PM) emitted by a modern aircraft engine. During this work, we established radial and angular profiles of PM properties in the engine hot flow at different engine thrust settings related to the aircraft main operating conditions (idle, take-off, climb, approach and cruise).

The experimental set-up is composed of a sampling probe and 3 transport lines regulated at 160°C. On the first line we collected exhaust samples on quartz filters, transmission electron microscopy (TEM) grids and silicon windows to perform respectively analyses of elemental/organic carbon ratio (EC/OC), morphology (TEM), elemental composition (EDX) and chemical composition by FTIR. In parallel, we deployed on the second line, a Cambustion DMS 500 in order to obtain the real time size distribution of the emitted particles. Finally, the third line was diluted by 35°C heated nitrogen, by means of a Palas VKL-10 dilutor. This allowed us to make various kinds of additional measurements by two Scanning Mobility Particles Sizer SMPS (one with condensation nuclei counter, CPC, and one with a Faraday cup electrometer, FCE), one Nano-particle Surface Area Monitor (TSI NSAM), one Multi Angle Absorption Photometer (Thermo MAAP), one Pegasor Particle Sizer as well as two Condensation Nuclei Counters (CPC). The experimental set-up used and the successful measurement campaign allowed a fruitful collection of data on number, size, mass, elemental composition and morphology of particles emitted by an aircraft engine.

### RESUME

Compte tenu de la croissance régulière du transport aérien, le gouvernement français a décidé de soutenir une étude visant à mieux comprendre les processus de formation des traînées de condensation, leur impact sur le climat, et également de prévenir et de maîtriser leur apparition et leurs effets. Dans ce cadre, nous avons réalisé une campagne de mesure des émissions particulaires (PM) d'un turbo-réacteur moderne. Lors de ce travail, nous avons effectué des profils radiaux et angulaires d'émissions particulaires dans le flux principal du moteur pour différents régimes correspondant aux principales conditions de fonctionnement d'un avion (roulage, décollage, montée, approche, croisière).

Le dispositif expérimental mis en œuvre repose sur un robot de prélèvement, associé à trois lignes de transport, chacune étant régulée à une température de 160°C. Sur la première de ces lignes, des prélèvements sur filtres en fibre de quartz, grilles MET et fenêtres en silicium ont été réalisés afin de procéder respectivement à des analyses *a posteriori* du ratio en carbone élémentaire et organique

(EC/OC), de la morphologie (MET) et de la composition élémentaire (EDX) et chimique (FTIR). En parallèle sur la seconde ligne, un granulomètre Cambustion DMS 500 a été utilisé afin de caractériser en temps réel la distribution en taille des aérosols émis. Enfin, un système de dilution Palas VKL-10 a été implanté en aval de la troisième ligne (dilution réalisée à 35°C avec de l'azote), afin d'être compatible avec les conditions d'utilisation des dispositifs de métrologie des aérosols. Deux granulomètres SMPS (l'un reposant sur un compteur à noyau de condensation, CPC, et l'autre sur un électromètre, FCE), un appareil de mesure de concentration surfacique (TSI NSAM), un appareil de mesure de concentration massique (Thermo MAAP), un Pegasor ainsi que deux compteurs à noyaux de condensation (CPC) ont ainsi été mis en œuvre. Les matériels et techniques employés durant la campagne ont ainsi permis de collecter des données en nombre, taille, masse, composition élémentaire et morphologie des aérosols pour un turboréacteur aéronautique civil.

## 1 INTRODUCTION

Les activités commerciales aéronautiques sont en croissance régulière (Airbus, 2013 ; Boeing, 2013). Leurs impacts sur le réchauffement climatique et la qualité de l'air (Lee et al., 2010; Bond et al., 2013) sont des sujets majeurs de préoccupation sociétale et nécessitent encore à ce jour de nombreux travaux tant à la fois expérimentaux que théoriques. Dans le cadre des travaux du CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile), le gouvernement français a décidé de financer 6 projets de recherche afin de mieux comprendre les processus de formation des traînées de condensation, leur impact sur le climat, et également de prévenir et de maîtriser leur apparition et leurs effets. Le projet MERMOSE (<http://sites.onera.fr/MERMOSE/>) représente la première partie de ce lot de projets de recherche. Ses objectifs sont de fournir des données d'émission pour un moteur aéronautique moderne et d'utiliser ces informations afin de développer des connaissances fondamentales sur l'interaction des suies avec l'eau. Différents partenaires à la fois industriels (SNECMA), institutionnels (ONERA et IRSN) et académiques (CINaM, CORIA, PC2A, PhLAM) participent à ce projet. Nous présentons ici le volet correspondant à une campagne de mesure des émissions particulières (PM) d'un turboréacteur moderne SaM 146. Durant cette expérimentation, nous avons effectué des profils radiaux et angulaires d'émissions particulières dans le flux principal du moteur à 5 cm en aval de la sortie-moteur pour différents régimes correspondant aux activités principales d'un avion (roulage, décollage, montée, approche, croisière).

## 2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Ce travail de caractérisation des émissions d'un moteur moderne a été effectué sur un SaM 146 (figure 1). Ce turboréacteur produit par PowerJet est actuellement utilisé pour la propulsion de l'avion de transport régional russe Sukhoï Superjet 100 (70-120 places), couvrant la gamme des 13 500 à 17 800 livres. Le moteur a été certifié en juin 2010, et l'avion est entré en service en avril 2011 (Powerjet, 2013).

Le dispositif que nous avons mis en place afin de mesurer les émissions gazeuses et particulières du turboréacteur se compose de plusieurs parties. Tout d'abord, un bras de prélèvement est porté par un robot, pareillement à ce qui est fait par Snecma dans le cadre de mesures de certification. Ce bras est équipé d'une aiguille permettant de réaliser un prélèvement en un point précis à 5 cm dans le plan de sortie du moteur au sein du flux primaire. En sortie du bras, une section dite "col de cygne" peut être chauffée si besoin afin de limiter les phénomènes de condensation de vapeurs dans la ligne. Cette partie est ensuite suivie d'une ligne thermostatée de 5 m et d'une seconde ligne thermostatée de 3 m. La température de ces deux lignes de prélèvement est réglée à 160°C à l'aide de cordons chauffants. A la sortie de ces lignes, un séparateur est mis en place pour pouvoir conduire alternativement l'échantillon vers les moyens de mesure pour l'analyse de gaz ou pour l'analyse particulaire.

L'ensemble des lignes est soit en acier inoxydable soit en PTFE chargé au carbone. La figure 1 représente la disposition générale des moyens de mesure des émissions du SaM146. Nous y retrouvons tout de suite après le prélèvement en sortie de moteur, une séparation entre la ligne d'analyse des gaz et la ligne d'analyse des particules. La ligne d'analyse des particules est divisée en 3 sections. Tout d'abord une première section (en rouge sur la figure 1) où l'échantillon est thermostaté à 160°C. Ensuite une partie où l'échantillon est dilué via un boîtier VKL 10 de la société Palas® alimenté par de l'azote chauffé et thermostaté à 35°C (en orange sur la figure 1) grâce au système Dekati® "Pressurised Air Heater". En amont du boîtier de dilution, une mesure de pression est réalisée avec un manomètre capacitif absolu thermostaté à 200°C "Baratron". Durant l'étude, pour protéger les appareillages

de mesures (sauf les SMPS) nous avons utilisé un cyclone en acier inoxydable URG-2000-30ENS-2 de la société URG®, avec un diamètre de coupure associé de  $1,69\ \mu\text{m}$  dans nos conditions expérimentales. Enfin, des sections sont laissées à température ambiante (en bleu sur la figure 1). Nous avons réduit autant que faire se peut la longueur des lignes de prélèvement afin de limiter les phénomènes de pertes de particules affectant l'échantillon.

Les équipements employés sont en premier un mini-impacteur (Lottin et al., 2012) afin de déposer les particules sur des grilles de microscopie électronique (Holey Carbon film sur grille en cuivre, Agar Scientific) et sur des fenêtres en silicium (UQG Optics) afin de respectivement réaliser une analyse morphologique TEM (Lottin et al., 2012) et une analyse de la composition chimique par FTIR (Delhayé, 2007). En parallèle, des prélèvements sur filtre en fibre de quartz sont effectués afin de mener à la fois une analyse du ratio "elemental carbon" sur "organic carbon" (EC/OC, Ouf et al., 2012) mais aussi une analyse des composés de type HAP adsorbés ou absorbés par les suies par LD TOF-MS (Faccinetto et al., 2011). Sur une seconde ligne dissociée, un granulomètre DMS 500 a été mis en œuvre afin de déterminer en temps réel la distribution granulométrique en termes de diamètre de mobilité électrique sur une gamme de 5 nm à 1000 nm. In-fine, la troisième ligne, présentant un système de dilution PALAS VKL 10, a permis la mise en œuvre de deux granulomètres SMPS (l'un avec un détecteur de type CNC : SMPS+C et l'un avec un électromètre SMPS+E), deux compteurs de concentration en nombre de particules CPC GRIMM 5.403, un compteur de concentration surfacique déposée NSAM TSI 3550, un compteur de concentration en nombre Pegasor et un compteur de concentration massique MAAP Thermo 5012. A noter que le taux de dilution du système VKL 10 étant sensible aux conditions de pression spécifiques aux différents régimes moteur, ce paramètre a été déterminé en cours d'expérimentation à l'aide d'un analyseur de gaz  $\text{CO}_2$  MIR2M de la société Environnement SA et mis en œuvre par SNECMA.

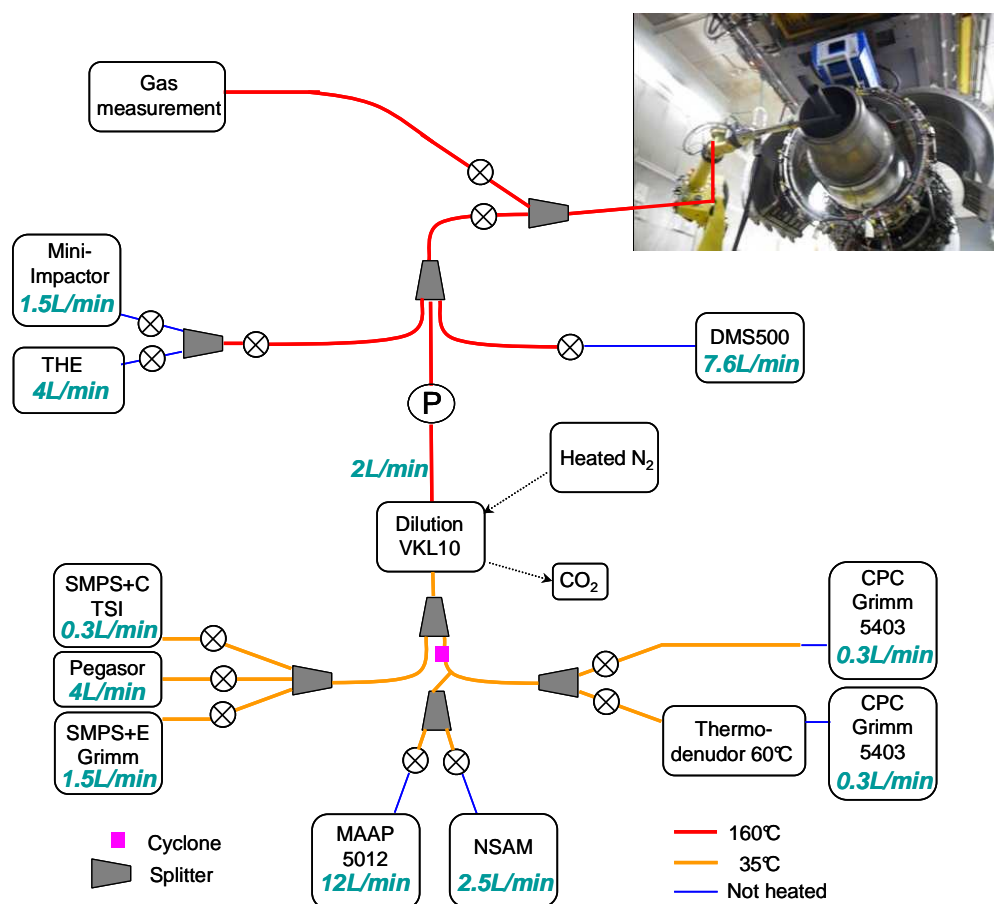


Figure 1 : Schéma général du dispositif mis en place pour la campagne de mesure MERMOSE avec un moteur SaM146

Nous présentons ici une synthèse des résultats obtenus sur les émissions particulaires pour une variation de régime comprenant des paliers à 30% (simulation du régime d'approche), 70% (simulation du régime du vol de croisière), 85% (simulation du régime de montée) et 100% (simulation du régime de décollage).

### 3 RESULTATS

#### 3.1 Morphologie et structure

La figure 2a est une image représentative des échantillons de suie collectés sur les grilles de microscopies. De petits agrégats clairsemés et composés de quelques particules primaires de suie sont aisément observables. La morphologie sphérique et la texture turbostratique des particules primaires de suie apparaissent clairement sur la figure 2b.

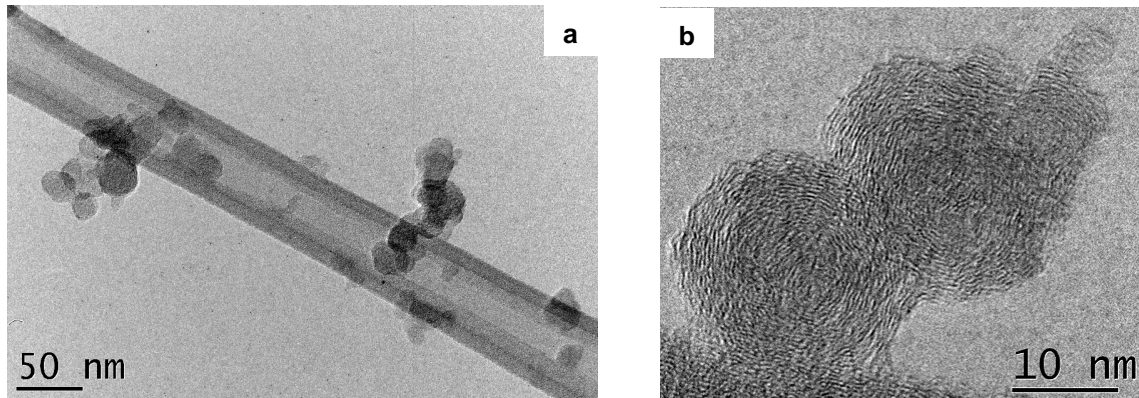


Figure 2a. Micrographie MET ( $E=300$  keV) montrant des agrégats de suie. Figure 2b. Particules primaires de suie présentant une texture turbostratique ( $E=300$  keV). Régime moteur : 85%

Les premières études des clichés de microscopie ont permis d'établir les distributions en taille des particules primaires pour les régimes de 70% et 85%. Dans les deux cas, nous observons une distribution log-normale centrée sur un diamètre moyen géométrique de 15,2 nm pour le régime simulant le vol de croisière (70%) et de 16,6 nm pour celui simulant la montée (85%). Ces résultats complètent ceux reportés par Delhay (2007) ainsi que Lottin et al. (2012) pour d'autres turboréacteurs (CFM56).

En parallèle de l'analyse morphologique, le microscope électronique étant aussi équipé d'une sonde de spectrométrie dispersive d'énergie de rayons X (XREDS), nous avons de plus réalisé des analyses chimiques élémentaires. La composition chimique élémentaire ainsi déterminée est de  $96,7 \pm 0,9$  atome % de carbone,  $3,2 \pm 0,9$  atome % d'oxygène,  $0,08 \pm 0,03$  atome % de soufre et quelques traces de calcium ( $8 \cdot 10^{-4} \pm 2 \cdot 10^{-4}$  atome %) pour le régime 70%. En ce qui concerne le régime 85%, cette composition est de  $96,9 \pm 0,8$  % de carbone,  $3,0 \pm 0,9$  % d'oxygène,  $0,07 \pm 0,02$  % de soufre et  $0,02 \pm 0,03$  % de calcium. Pour ces deux régimes, nous pouvons noter la dominance de carbone formant les suies, la présence de traces de calcium et de soufre étant probablement liée à l'huile d'origine minérale lubrifiant le moteur et/ou aux impuretés du carburant.

#### 3.2 Distributions en taille et en nombre

La figure 3 représente des distributions typiques issues du DMS 500 pour différents régimes moteurs.

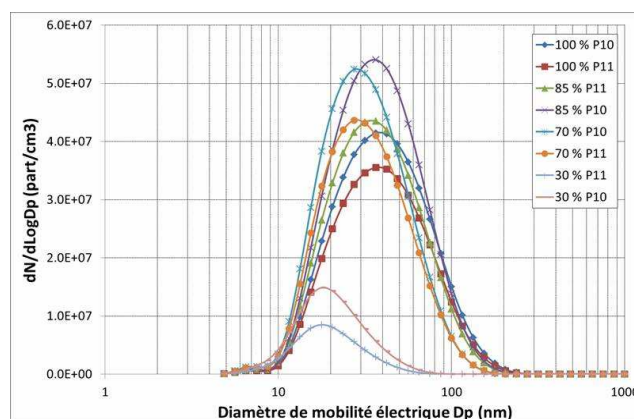


Figure 3. Distributions en taille obtenues avec le DMS 500 pour différents régimes moteurs en deux points distincts (P10 et P11) en sortie de tuyère.



Pour chacun des régimes, nous avons observé une distribution monomodale de type log-normale. Le diamètre de mobilité électrique médian est compris entre 40 et 55 nm pour des régimes correspondant aux phases de croisière simulée (70%), de montée (85%) et de décollage (100%) tandis que celui pour le régime d'approche (30%) est inférieur à 30 nm. Nous constatons que pour des régimes de 70% et plus, nous obtenons, au mode de la distribution exprimée ici en échelle de type  $dN/d\log D_p$ , environ quatre fois plus de particules, de l'ordre de  $1.10^7$  à  $4.10^7$  particules/cm<sup>3</sup>, par rapport au régime 30%. Une telle évolution de la distribution granulométrique sera in-fine confortée par l'analyse des clichés de microscopie électronique, actuellement en cours pour l'ensemble des régimes.

### 3.3 Evolution des paramètres physiques en fonction du régime moteur

La figure 4 présente l'évolution de la concentration en nombre et du diamètre médian des particules, issus du DMS 500, ainsi que celles provenant du CPC, du Pegasor et du SMPS+C corrigées du facteur de dilution, en fonction de la poussée moteur.

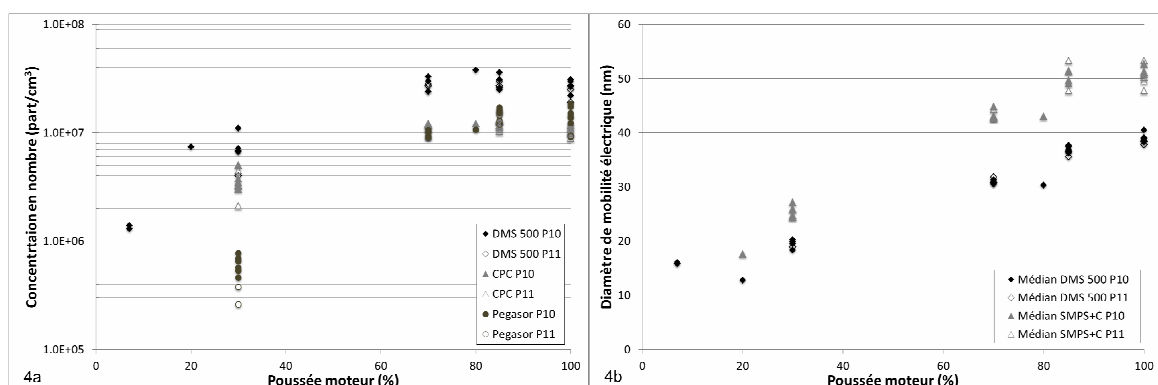


Figure 4. Evolution de la concentration en nombre de particules (4a) et du diamètre médian (4b) des particules en fonction de la poussée moteur pour les points P10 et P11.

Tout d'abord pour la concentration en nombre (figure 4a), on retrouve, pour l'ensemble des moyens de mesure, une augmentation en fonction de la puissance moteur jusqu'à un maximum à 85 %. Les écarts observés entre le DMS 500 et le couple CPC/Pegasor sont dus à des pertes plus significatives pour la ligne de prélèvement associée au CPC et au Pegasor. Par ailleurs, la concentration en nombre déterminée par le Pegasor est en bon accord avec celle déterminée par le CPC (et ce pour les mêmes conditions de prélèvement). Un écart significatif est néanmoins observé pour 30 %, la constante de calibration du Pegasor n'étant certainement plus valable pour le type de particules émises à ce régime (cf. figure 4b et 5, Ntziachristos et al., 2013). De plus, le Pegasor était chauffé à 180°C, ce qui a pour effet de volatiliser une partie de la matière organique condensée, et avait un diamètre de coupure fixé à 20 nm alors que le CPC a le sien fixé à 4,5 nm. Le diamètre médian (figure 4b) quant à lui augmente de manière continue avec la puissance moteur, allant d'une valeur proche de 15 nm pour 30% jusqu'à 40-50 nm pour 100%. A noter que les évolutions observées à partir des mesures DMS 500 et SMPS+E sont en bon accord, néanmoins un écart de près de 25% est constaté, le DMS 500 sous-estimant le diamètre médian par rapport au SMPS+E. In-fine, nous présentons sur la figure 5 l'évolution du ratio EC/OC en fonction de la puissance moteur.

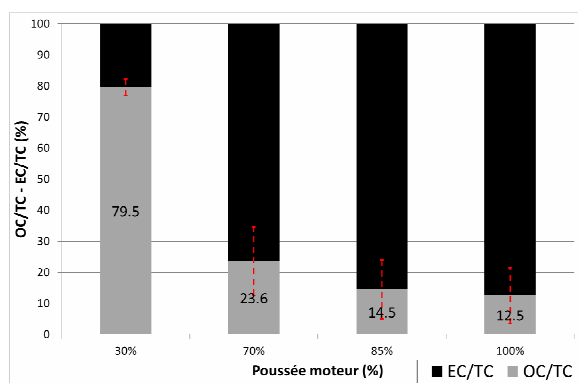


Figure 5. Evolution des ratios EC/TC et OC/TC en fonction de la puissance moteur.

Le ratio OC/TC (Organic Carbon/Total Carbon), diminue de manière très notable avec la puissance moteur, atteignant une valeur de 12,5 % pour 100 %. A l'inverse, cette fraction représente 79,5 % de la phase carbonée de l'aérosol pour le régime 30 %. On peut alors légitimement s'interroger sur la réactivité et l'hygroscopicité de particules présentant de telles disparités physico-chimiques. Il conviendra de conforter ces analyses EC/OC très globales avec les résultats des futures analyses chimiques qui seront menées dans le cadre du projet MERMOSE par FTIR mais aussi par XPS (Ouf et al., 2012) et LD TOF-MS (Faccinnetto et al., 2011).

#### 4 CONCLUSION

Nous avons présenté ici les premiers résultats issus des données collectées lors de la première campagne de mesure MERMOSE en sortie d'un turboréacteur civil. Lors de cette campagne, où différents régimes moteurs et emplacements de collecte ont été étudiés, nous avons réalisé des mesures en nombre, en masse de particules, et établi des distributions en tailles à l'aide d'une large gamme d'appareils. De plus, l'utilisation conjuguée du NSAM et de CPCs nous permettra prochainement, tout comme Bau (2008) l'a démontré, de déterminer une surface moyenne d'une particule associée à chaque régime moteur qui pourra être comparée à celle déterminée par analyse MET. L'apport de l'analyse EC/OC en plus de cette détermination de surface permettra donc de proposer des grandeurs pertinentes pour la réactivité des suies issues du SaM146.

L'ensemble des informations nous permettra d'établir notamment des indices d'émission et une caractérisation fine des suies émises en fonction des régimes. Ces données serviront en premier lieu à alimenter les modèles de prédiction de la formation de traînées de condensation. Elles seront également utiles pour cibler les propriétés des suies à générer en laboratoire afin de réaliser des études sur leur réactivité vis-à-vis des gaz atmosphériques ainsi que leur hygroscopicité (Grimonprez et al., 2014) et leur capacité à servir de noyaux de croissance de cristaux de glace dans les conditions de vol.

#### REFERENCES

- Airbus, 2013, <http://www.airbus.com/company/market/forecast/>
- Bau, S., 2008. Etude des moyens de mesure de la surface des aérosols ultrafins pour l'évaluation de l'exposition individuelle. Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, 3 Décembre 2008.
- Boeing, 2013, <http://www.boeing.com/boeing/commercial/cmo/>
- Bond, T.C., et al., 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5380-5552.
- Delhaye, D., 2007. Détermination expérimentale des caractéristiques physiques et chimiques de particules de suie émises par des turboréacteurs d'avion. Thèse de Doctorat de l'université Aix-Marseille II, 10 Décembre 2007.
- Lee, D.S., et al., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, 44, 4678-4734.
- Faccinnetto, A., et al., 2011. High-sensitivity detection of polycyclic aromatic hydrocarbons adsorbed onto soot particles using laser desorption/laser ionization/time-of-flight mass spectrometry: An approach to studying the soot inception process in low-pressure flames. *Combustion and Flame*, 158, 227-239.
- Grimonprez S., et al., 2014. Réactivité, propriétés hydrophiles et optiques de suies prélevées dans des flammes. 29<sup>ième</sup> Congrès Français sur les Aérosols, Paris, France, 22-23 Janvier 2014.
- Lee, D.S., et al., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, 44, 4678-4734.
- Lottin D, et al., 2012. Towards an identification of aircraft soot among urban background: focus on nanoparticles emitted by CFM56 turbofan engines. *European Aerosol Conference*, Grenada, Spain, 2 – 7 September 2012.
- Ntziachristos, L., et al., 2013. Application of the Pegasor Particle Sensor for the measurement of mass and particle number emissions. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 6, 521-531.
- Ouf, F.-X., et al., 2012. Characterization of aerosols produced by a commercial combustion aerosol generator MiniCAST<sup>TM</sup> 5201: EC/TC, size distribution, morphology and optical properties. *European Aerosol Conference*, Grenada, Spain, 2-7 September 2012.
- Ouf, F.-X., et al., 2012. Etude par rayonnement synchrotron X d'aérosols carbonés nanostructurés fraîchement émis. 28<sup>ième</sup> Congrès Français sur les Aérosols, Paris, France, 23-24 Janvier 2013.
- Powerjet, 2013, [www.powerjet.aero](http://www.powerjet.aero)